M型星AT Mic的X射线耀发统计研究*1

胡施展[1,2]，袁为民[1,2]
(1. 中国科学院国家天文台，北京 100101)
(2. 中国科学院大学天文与空间科学学院，北京 100049)

摘 要：恒星耀发是剧烈的恒星活动过程，对恒星周围的行星上的大气构成和生命演化有重大影响。恒星耀发的辐射主要分布在光学和X射线波段，其中耀发时X射线波段流量可以增大数十倍至数百倍。M型耀星是最有可能存在类地行星的宿主恒星，因此研究M型耀星的X射线耀发分布对寻找宜居的类地行星具有重要意义，并且也可以为即将发射的爱因斯坦探针卫星项目（EP）对恒星耀发的探测数目估计提供参考。我们利用X 射线全天监视器MAXI的巡天监测数据研究了M型耀星AT Mic的 X 射线耀发的统计性质。从 MAXI11年的巡天数据中，通过分析图像、光变曲线和能谱数据和信息，发现 MAXI在 11 年间 一共探测到 10 次信噪比大于 3的耀发，获得了耀发光度的统计分布。在此基础上，我们对恒星耀发的耀发频率进行了估计。

关键词：恒星耀发；X射线；M型星
中图分类号：P144　　**文献标识码**：X　　**文章编号**：XXXX-XXXX-(XXXX)X-XXXX-XX

恒星耀发(stellar flare)广泛存在于光谱型为F，G，K，M的晚型恒星上，是恒星磁场能量的突然释放的表现，典型的恒星耀发的光变曲线表现为快速的上升和缓慢的衰减，一般伴随着等离子体温度的升高和降低[1]。恒星耀发产生于恒星冕区中的磁重联过程，在冕区高层大气中，通过磁力线的断裂和重联过程，磁能转化为粒子的动能和辐射能，辐射能主要集中在冕区的软X射线波段的热韧制辐射和色球层低层或光球层的白光辐射。所以软X射线的光度和能量是恒星耀发强度的重要指标[2]。恒星耀发的光度一般在10^{26}-10^{33}erg/s，能量一般在10^{28}-10^{37}erg，温度一般在10^{6}-10^{8}K[1]。

M型恒星是宇宙中数目最多的恒星，而且由于温度较低，有合适的宜居带，因此是探索系外宜居行星的重要方向。耀发会影响恒星周围的行星的大气化学组分的演化，导致大气损失，因此对生命的产生和演化有非常重要的影响。恒星耀发产生X射线辐射的频率和能量可能比太阳耀发高几个数量级。在X射线和光学波段，某些耀发总辐射能量达到10^{35}-10^{38}erg，或者耀发光度达到10^{30}-10^{33}erg/s，比太阳上最大的耀发还要高1-4个量级，这些耀发被称为超级耀发(superflare)。超级耀发可能会对生命产生灾难性的影响[1]。因此研究M型恒星的超级耀发频率，可以在类地行星中筛选出不宜居的行星。

迄今为止，关于耀发频率的研究不多，大多集中在对光学普通耀发的研究。文[3-5]通过光学波段Kepler卫星长达4年对同一天区的观测数据，统计得到了所有光谱型恒星光学耀发的能量分布和超级耀发频率。文[6]利用Kepler卫星数据，研究了类太阳恒星产生超级耀发的频率。在Kepler卫星结束运行之后，继任者TESS卫星的最灵敏波段在M型恒星的波段，使用TESS数据，文[7-9]研究了所有类型光学耀发的频率。在X射线波段，文[10]使用MAXI2009-2011年对全天的长时间监测数据，分析了来自13个活跃恒星的23个超级耀发，给出了第一个全天X射线耀发频率的分布。文[11]分析了XMM-Newton卫星7年的历史数据，搜寻其中对恒星的观测，进而分析出了占全天1%的天区的恒星的耀发频率。

---

*基金项目：中科院空间科学先导专项(XDA15052100)资助.
收稿日期：XXXX-XX-XX；　修订日期：XXXX-XX-XX
作者简介：胡施展，男，硕士，研究方向：天体物理。 Email:husz@bao.ac.cn
袁为民，男，研究员，研究方向：天体物理. Email:wmy@bao.ac.cn

受限于X射线天文卫星的运行模式，一直以来缺少X射线波段对于同一个源的长期的监测，因此无法得到很好地统计结果。MAXI是日本宇航局（JAXA）搭载于国际空间站的X射线全天监视器[13]，于2009年发射运行。MAXI的主要探测器是气体狭缝相机GSC(Gas Slit Camera)，由狭缝、准直器、和一维位置灵敏的气体正比计数器组成。MAXI/GSC的探测能量范围为2-30keV，主要目标是监测全天的暂现源。MAXI/GSC 具有两个160°× 1.5°的扇形视场，视场平面垂直于空间站的轨道平面;两个视场的中心指向分别是垂直于空间站的运动方向和与空间站运动方成40°夹角。随着空间站的轨道运动， MAXI每92分钟完成一遍对几乎全天的扫描。根据天体位置相对于视场中心轴的夹角不同，每一轨对于单个目标源的监测时长约为100s至200s不等。至2021年为止，MAXI已累积了超过11年的对于明亮的耀发恒星的观测数据，因此可以用来很好地研究单个耀发恒星长时间的耀发频率。所以对于持续时间较长的恒星耀发，MAXI可以有连续一轨以上的连续观测，对于持续时长较短的，MAXI有一轨可以看到耀发[10]。MAXI数据一般分为 4 个能段，分别为2-20keV、2-4keV、4-10keV、10-20keV，MAXI GSC 在2-10keV 能段的本底噪声最小，对恒星耀发的观测最灵敏。

在M型耀星中，AT Mic是一个很好的研究对象。AT Mic是距离太阳系10.2pc的活跃M型双星(dM5.5+dM4.5) [12]。文[14]观测到过这个源的大的光学耀发，文[15-17]观测到过X射线耀发。文[10]包含了来自这个源的MAXI观测的2009-2011年中的1次X射线耀发数据，这次也包含在我们的研究之中。

我们根据MAXI对AT Mic监测的每一轨的X射线计数率数据，找到可能的耀发时刻。通过对应时间的24小时积分的图像，排除太阳活动的影响，确认耀发的真实性。然后根据耀发前后0.4天以内的流量，抽取光变曲线，并对光变曲线进行拟合，计算得到耀发的时长。然后下载耀发峰值时刻的MAXI观测能谱数据，进行能谱分析和拟合，以计算耀发的X射线流量，进而计算得到耀发的光度、能量和信噪比。最终我们得到了10次信噪比高于阈值的耀发，计算了耀发光度的分布，并估计这颗恒星产生超级耀发的频率。

1 数据分析

1.1 耀发图像

我们选取了MAXI对AT Mic在2009-2021年中的所有观测数据进行研究。从MAXI的数据网站[2]上可以下载AT Mic在11年中的各个波段的流量数据。根据2-20keV的流量从高到低排序，可以找到MAXI观测AT Mic时的异常值。由于AT Mic的宁静态的X射线流强低于MAXI的监测灵敏度，因此在宁静态时不能被MAXI探测（无法区分恒星与背景），只有在耀发时，MAXI在AT Mic方向接收到光子数目才会高于背景涨落。根据MAXI24小时积分的图像来排除由于观测指向太阳时或者AT Mic位于MAXI 视场的边缘时导致的光子计数率异常。

[2] http://maxi.riken.jp/pubdata/v7l/

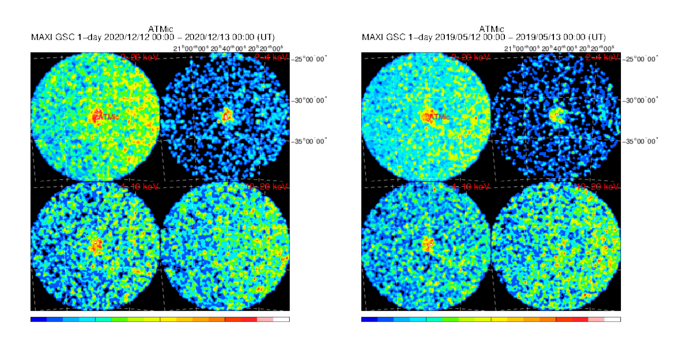


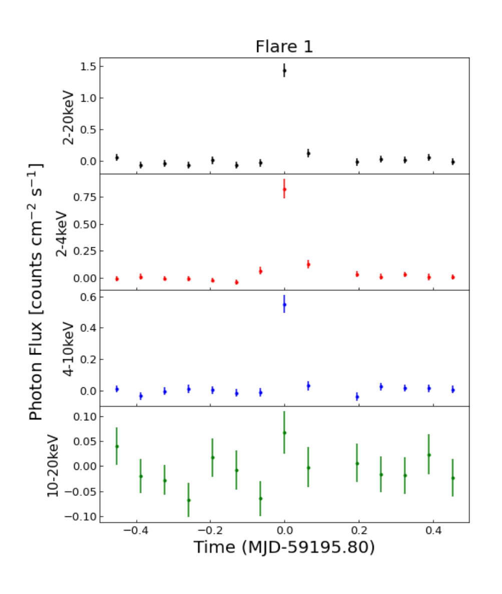
图 1 最明亮的两次耀发的不同波段的24小时累积计数的图像

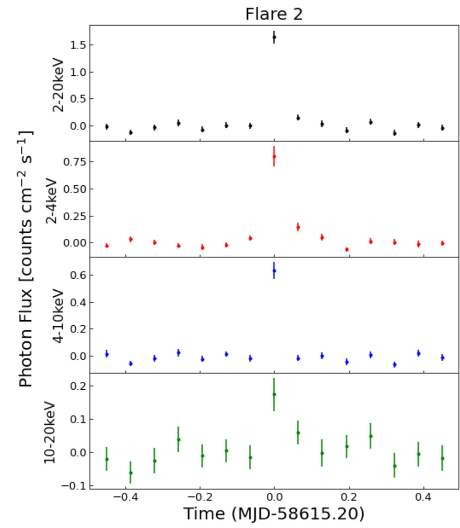
Figure 1 Images of cumulative X-ray counts in 24 hours in four bands for two brightest flares

图1展示了光子数最高的两次耀发的不同波段的24小时累积的图像，左上图为2020年12月12日（MJD59195），右上图为2019年5月12日（MJD58615）。每幅图中左上为2-20keV波段，右上为2-4keV波段，左下为4-10keV波段，右下为10-20keV波段。中心有明显的因为耀发产生的集中区域。在2-4keV波段背景最小，耀发产生的斑点更加明显。在10-20keV波段由于背景光子计数相比恒星 X 射线计数高得多，中心看不到明显的X 射线源。

1.2 光变曲线与拟合

恒星耀发的光变曲线一般呈现为快速上升、指数衰减的趋势[10]。在确定了耀发时刻之后，我们选取耀发时刻前后的光子计数率做出不同波段的光变曲线，然后进一步进行光变曲线的拟合。





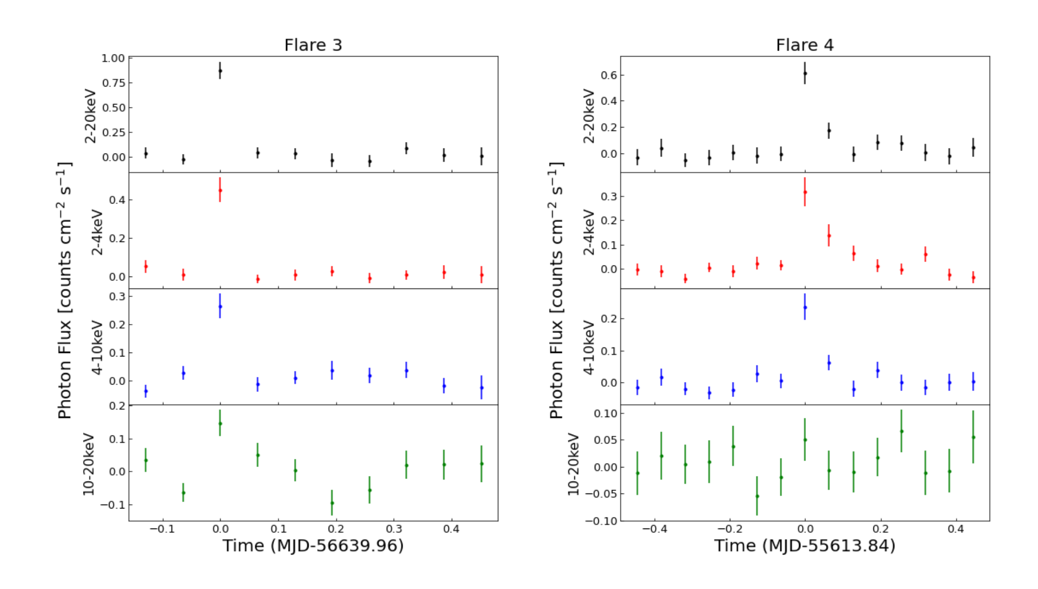


图 2 最明亮的两次耀发的不同波段的光变曲线

Figure 2 light curves of two most luminous flares in four bands

图2显示了光子数最高的四次耀发的不同波段的光变曲线，同一个光变曲线图以内，连续两个数据点的相隔时间为一轨（92分钟）。根据2-20keV、2-4keV、4-10keV波段的光变曲线，可以看到耀发时由平静态在一轨时间内流量快速上升达到最高的峰值，在衰减时第1、2、4次耀发衰减时长长于一轨，其中尤其是第4次耀发，2-4keV的衰减用时3轨才恢复到宁静态。这说明AT Mic可以产生衰减时长长于4小时的耀发。考虑不同波段的数据，这几个耀发在2-4keV波段和4-10keV波段都有非常明显的耀发曲线，第2、3次耀发的10-20keV波段也能在耀发时看到明显上升。

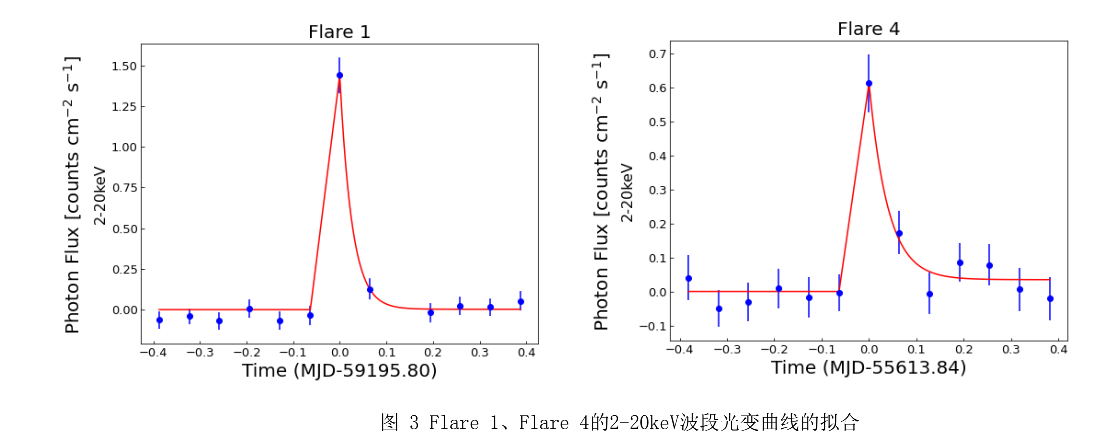


图 3 Flare 1、Flare 4的2-20keV波段光变曲线的拟合

Figure 3 light curves fit of Flare 1 and Flare 4 in 2-20keV band

图3显示了第1次和第4次耀发的2-20keV的光变曲线的拟合。根据之前的恒星 X 射线耀发研究结果，对于衰减期我们使用指数衰减模型，并使用e折时间尺度（e-folding time）作为耀发时长[10]。在拟合的结果中，大多数耀发和第一次耀发衰减相似，耀发时长较短，少部分耀发与第四次耀发时长相似，耀发时长长于一轨。所有耀发的耀发时长见表1。其中少数幅度较小的耀发的时长不能被很好限制，在表1中没有列出对应的数值。

由于 MAXI 的时间采样率不够高，为了排除由于统计涨落引起的、可能的假耀发，需要

确定耀发的显著性。根据能谱文件中提供的本底计数，我们计算了所有耀发峰值时刻的信噪比（signal to noise ratio，SNR）。我们选择SNR>3 的耀发作为本研究的耀发样本，一共得到了10次AT Mic的耀发，这些耀发的数据和参数见表1。表1按照光子数的数目，由高到低进行排列。表1显示了这些耀发的日期、曝光时间、计数率，和计算得到的流量、2-20keV峰值光度、耀发时长、能量、信噪比。以下对这一耀发样本进行分析。

1.3 能谱拟合

在确定了耀发时刻之后，我们从 MAXI 数据网站下载了对应观测时间的的能谱数据。我们选取耀发峰值时刻的能谱数据，使用X射线能谱拟合软件XSPEC version 12.11.1[19]进行能谱的拟合。我们使用了2-20keV的光子。因为源的总光子数目有限，我们使用了单温的热等离子体apec模型对所有耀发统一进行拟合[20]。由于AT Mic距离很近（10.2pc），中性氢的柱密度很低；而且 2keV 以上 星际介质对X 射线的光电吸收截面较小，所以我们忽略星际介质对目标源的X射线的吸收效应。每10个光子分1个bin。除了最强的几次耀发之外，大部分耀发的总光子数较少，能谱只有几个能道，因此对模型的限制不强，获得的参数（温度）不确定性较大。对大部分耀发，模型拟合可以接受或基本可以接受。表1中给出了拟合得到的温度参数、拟合的归化的chi^2方值和拟合的自由度。

根据拟合能谱的模型，利用 XSPEC可以计算耀发峰值时刻的流量；根据恒星的距离可以计算耀发峰值的光度。结合耀发的光度和时长，计算得到了耀发的能量。图4展示了第一次耀发的能谱拟合结果。

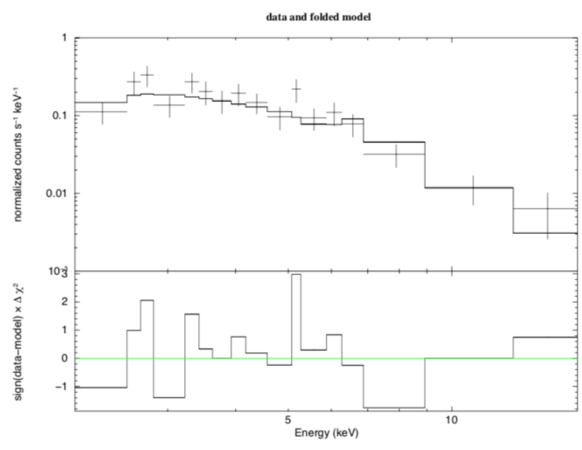


图 4 Flare 1的2-20keV波段能谱的拟合。上图为观测到的能谱和模型（实线），下图为拟合的残差。

Figure 4 Spectral fit of Flare 1 in 2-20keV band

表 1 每一次耀发的数据和参数

Tab. 1 Data and parameters of each flare

Flare	**MJD**	exposure (s)	counts	kT (keV)	χ^2_ν(dof)	Flux 2-20 keV (10^{-10}erg/s/cm^2)	$L_{x,peak}$ 2-20 keV (10^{31}erg/s)	duration (s)	Energy 2-20 keV (10^{34}erg)
1	59195.800	220	183	5.2	1.0 (15)	98.5	12.3	2158	26.5
2	58615.198	203	176	7.4	0.6 (15)	114.2	14.2	2613	37.1
3	56639.960	239	101	7.7	1.5 (8)	57.5	7.2	1675	12.0
4	55613.841	222	66	>10	0.9 (5)	47.9	6.0	3387	20.2
5	56068.731	222	48	3.6	1.9 (4)	22.1	2.8	4916	13.6

6	58586.518	214	41	5.4	2.0 (3)	26.9	3.4		
7	58495.242	120	39	>10	1.0 (3)	58.1	7.2	3545	25.6
8	56853.378	217	38	5.8	0.2 (3)	25.1	3.1		
9	56035.130	215	36	>10	1.0 (2)	32.2	4.0	4683	18.8
10	58279.930	119	27	>10	2.2 (2)	38.3	4.8	2415	11.5

注：由于大部分耀发数据X射线能谱信噪比较低，不能有效限制温度 kT 的误差，因此表中未给出误差估计。

2 结果分析与讨论

通过分析2009年8月至2021年3月之间 MAXI对 AT Mic 的所有光变监测数据，我们找到了10次信噪比>3 的耀发。如表1，这些耀发在时间上均匀地分布。在X射线2-20keV波段的流量范围在10^{-9}-10^{-7} erg/s/cm^{2}，光度范围在10^{31}-10^{33} erg/s，能量范围在10^{35}-10^{37} erg。这些耀发的e折时标在0.4小时至1.4小时。平均耀发时长为3174s，由于MAXI两次观测的时间间隔为92min，所以当AT Mic产生耀发时，被MAXI观测到的概率为57.5%。

我们对耀发光度进行统计分析。图 4给出了累计的耀发频率的分布，我们发现该分布可以用一个幂律函数拟合。这一结果与以前研究的结果一致[11]。

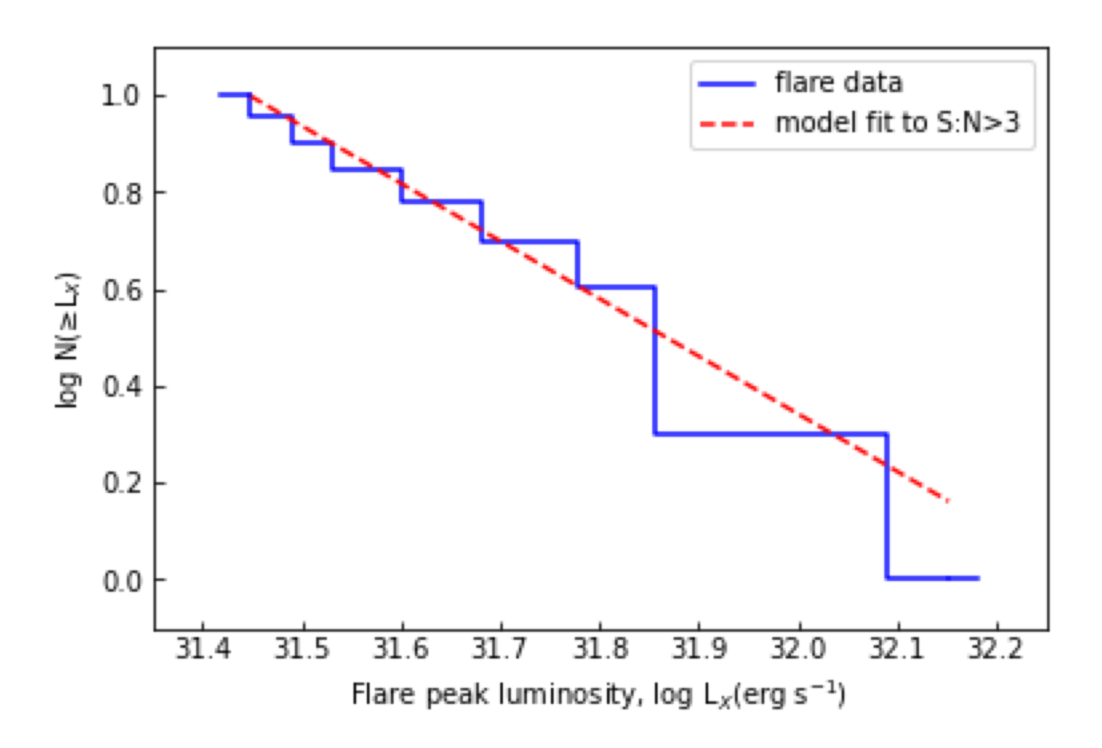


图 4 耀发光度累计频率分布和幂律函数拟合图

Figure 4 image of flare cumulative luminosity frequency distribution and fit with power law

通过拟合，得到的拟合方程为

$$N(>L_X/L_{X,ref}) = N_{ref}(L_X/L_{X,ref})^{-\alpha_L}$$

其中$L_{X,ref}$取2.8×10^{31}erg/s，N_{ref}固定为10，α_L拟合为1.19

假设恒星耀发的光度分布在10^{29}-10^{33}erg/s之间遵循同一个幂律函数分布，根据拟合得到的参数，我们可以估计2009年至2021年AT Mic产生光度$L_X>10^{30}$erg/s的超级耀发的耀发数目一共约为527次。进而估计每年AT Mic产生该光度以上的超级耀发频率为48次。由于当AT Mic产生耀发时，处于MAXI视场中的概率为57.5%，所以对以上数目需要做一个修正；因此，作为一个简单的估计，预期AT Mic每年真实产生的所有的超级耀发的频率约为83次。

爱因斯坦探针卫星（EP）在运行后将会看到多次恒星耀发，文[18]显示积分时长为1000s时，EP将可以探测流量$f_X>10^{-11}$erg/s/cm^2（0.5-4 keV）的耀发，转化为AT Mic的光度为$L_X>1.25\times10^{29}$erg/s；考虑EP和MAXI探测能段不同，光度需修正为1.6×10^{29}erg/s。AT Mic宁静期光度为2.13×10^{29}erg/s[17]，高于EP的灵敏度，假设耀发时光度至少增加两倍，根据拟合方程计算得到光度大于4.26×10^{29}erg/s的11年总耀发次数为1456次，并且考虑MAXI探测概率为57.5%，估计每年AT Mic产生的能达到EP的探测灵敏度的耀发次数约为230次。

EP 卫星轨道周期是97min，每轨三个定点指向观测，每个观测时间约20min。3轨可以完成对夜半区天空的覆盖。AT Mic每天可被覆盖约5次，每次20min。因此一天之内AT Mic被EP宽视场X射线望远镜WXT（视场3600平方度）所观测的总时长约为100min。因此EP对AT Mic的总监测时间占卫星运行时长的约7%。考虑到1年之中EP WXT在天空中的巡天指向，对AT Mic的可见时间只有半年左右。综合以上因素，估计EP每年可以探测到AT Mic X射线耀发的数目约为8次。

文[10]中估计 MAXI 看到的所有种类恒星平均耀发频率很低，与之相比，我们得到的 AT Mic 的耀发频率要更高，这说明 AT Mic 是非常活跃的耀发恒星，比普通耀发恒星活动性更强。文[17]中显示 AT Mic 宁静期光度为2.13×10^{29}erg/s，所以本文发现的耀发幅度在 22 倍至 562 倍。与文[10]中观测到的超级耀发幅度范围一致，比文[21]中观测到的同样来自 M 型耀发恒星 EV Lac 的超级耀发幅度小。

3 结论

本文通过对MAXI观测的AT Mic在2009-2021年的X射线长期监测数据进行分析。通过筛选流量较高的时刻和对应的耀发图像，得到了10次信噪比高于3的耀发。通过能谱拟合，发现这些耀发的流量在10^{-9}-10^{-8}erg/s/cm^{2}之间，光度在10^{31}-10^{32}erg/s之间，能量在10^{35}erg量级，耀发时长在0.4小时到1.4小时之间。

发现AT Mic产生超级耀发的频率大约为每年83次。通过与其他耀发恒星的耀发频率相比较，发现AT Mic的耀发频率更高。对于爱因斯坦探针卫星而言，AT Mic每年大约有230次耀发可以达到探测灵敏度；考虑到 EP 的巡天观测指向策略，估计每年探测到的耀发次数约为8次。

未来我们可以研究更多的MAXI视场内的耀发恒星的耀发分布，例如HR 1099、EV Lac，从而使用更多的耀发恒星的耀发频率，来得到更准确的全天恒星耀发频率的估计。在爱因斯坦探针卫星投入使用之后，预期将会获得灵敏度更高的全天恒星耀发数据。

参考文献：

[1] Arnold O. Benz, Manuel Güdel. Physical Processes in Magnetically Driven Flares on the Sun, Stars, and Young Stellar Objects [J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics. 2010. 48:241–87

[2] Manuel Güdel. X-ray astronomy of stellar coronae [J]. The Astronomy and Astrophysics Review volume. 2004. 12, 71–237

[3] Yang H Q, Liu J F. The Flare Catalog and the Flare Activity in the Kepler Mission [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series. 2019. 241:29(19pp)

[4] He H, Wang H N, Zhang M, et al. Activity Analyses for Solar-type Stars Observed with Kepler. II. Magnetic Feature versus Flare Activity [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series. 2018. 236:7(18pp)

[5] Davenport, James R. A. The Kepler Catalog of Stellar Flares [J] The Astrophysical Journal. 2016 .829:23(12pp)

[6] Maehara Hiroyuki, Shibayama Takuya, Notsu Shota, et al. Superflares on solar-type stars [J]. Nature. 2012. 485, pages478–481

[7] Günther Maximilian N., Zhan Zhuchang, Seager Sara, et al. Stellar Flares from the First TESS Data Release: Exploring a New Sample of M Dwarfs [J]. The Astronomical Journal. 2020. 159:60(16pp)

[8] Tu Z L, Yang M, Zhang Z J, Wang F Y. Superflares on solar-type stars from the first year observation of TESS [J] The Astrophysical Journal. 2021. 890:46(15pp)

[9] Feinstein Adina D., Montet Benjamin T., Ansdell Megan, et al. Flare Statistics for Young Stars from a Convolutional Neural Network Analysis of TESS Data [J]. The Astronomical Journal. 2020.160:219(16pp)

[10] Tsuboi Yohko, Yamazaki Kyohei, Sugawara Yasuharu, et al. Large X-ray flares on stars detected with MAXI/GSC: A universal correlation between the duration of a flare and its X-ray luminosity [J]. Publications of the Astronomical Society of Japan. 2016. 68:90(20pp)

[11] J. P. Pye ,S. Rosen, D. Fyfe, A. C. Schröder. A survey of stellar X-ray flares from the XMM-Newton serendipitous source catalogue: HIPPARCOS-Tycho cool stars [J]. Astronomy & Astrophysics. 2015. 581, A28

[12]Matsuoka M., Kawasaki K., Ueno S., et al. The MAXI Mission on the ISS: Science and Instruments for Monitoring All-Sky X-Ray Images[J]. Publications of the Astronomical Society of Japan. 2009. 61, 999

[13] Perryman M. A. C., Lindegren L., Kovalevsky J., et al. The Hipparcos Catalogue. [J]. Astronomy and Astrophysics. 1997. 323, L49

[14] García-Alvarez D., Jevremovic D., Doyle J. G., Butler C. J. Observations and modelling of a large optical flare on AT Microscopii [J]. Astronomy & Astrophysics. 2002. 383, 548

[15] S. M. Kahn, J. L. Linsky, K. 0. Mason, et al. HEAO 1 observations of X-ray emission from flares on dMe stars [J]. The Astrophysical Journal. 1979, 234, L107-L111

[16]Pallavicini R., Tagliaferri G., Stella L. X-ray emission from solar neighbourhood flare stars-A comprehensive survey of EXOSAT results [J]. Astronomy & Astrophysics. 1990. 228, 403-425

[17] A. J. J. Raassen, R. Mewe1 M. Audard, M. Güdel. The X-ray spectra of the flaring and quiescent states of AT Microscopii observed by XMM-Newton [J]. Astronomy & Astrophysics. 411,509-515

[18] 袁为民, 张臣, 陈勇, 等. 爱因斯坦探针: 探索变幻多姿的 X 射线宇宙. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 039502 Yuan W M, Zhang C, Chen Y, et al. Einstein Probe: Exploring the ever-changing X-ray Universe (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48:039502

[19]Arnaud K. A. XSPEC: The First Ten Years [J]. Astronomical Data Analysis Software and Systems V, A.S.P. Conference Series, 1996. Vol. 101

[20]Smith R. K., Brickhouse N. S., Liedahl D. A., Raymond J. C. Collisional Plasma Models with APEC/APED: Emission-Line Diagnostics of Hydrogen-like and Helium-like Ions [J]. The Astrophysical Journal, 2001. 556, L91

[21]Rachel A. Osten, Olivier Godet, Stephen Drake, et al. The mouse that roared: a superflare from the dMe flare star EV lac detected by swift and konus-wind [J]. The Astronomical Journal. 2010. 721:785-80

A statistical study of X-ray Stellar Flares of the M-type Star AT Mic

Shizhan Hu[1,2], Weimin Yuan[1,2]
(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences ，Beijing 100101, China)
(2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Acadamy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Stellar flares are violent processes of stellar activity, which have a significant impact on the atmospheric composition and life evolution on exo-planets around the host stars. Stellar flares are observed mainly in the optical and X-ray bands, with sudden increase of the X-ray fluxes as large as several to hundreds of times. M-type stars are the most likely host stars of earth-like planets. Therefore, it is of great interest to study the statistical incidence of X-ray flares of M-type stars as far as the search for habitable exo-planets is concerned. On the other hand, the occurrence frequency of X-ray stellar flares, particularly for M stars, is of interest for the estimation of the detection rate of X-ray transients with the CAS's Einstein Probe (EP) mission. We studied the statistical property of X-ray flares from the well-known M-type star AT Mic using the 11-year monitoring data from MAXI. We analyzed the X-ray images, light curves and spectra of the MAXI data on AT Mic and found 10 flares with S/N >3. The statistical distribution of the flare luminosity is obtained. Based on this result, we estimated the occurrence frequency of stellar flares from AT Mic.

Key words: stellar flare；X-ray；M-type star